

非平衡凝縮を伴うターボ機械翼列の大規模流動解析とその実用化

著者	笹尾 泰洋
号	11
学位授与番号	352
URL	http://hdl.handle.net/10097/37819

氏名（本籍地）	ささ お やすひろ 笹尾 泰洋
学 位 の 種 類	博 士（情報科学）
学 位 記 番 号	情 博 第 352 号
学位授与年月日	平成18年 3 月24日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科、専 攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）情報基礎科学専攻
学 位 論 文 題 目	非平衡凝縮を伴うターボ機械翼列の大規模流動解析とその実用化
論 文 審 査 委 員	（主査）東北大学教授 山本 悟 東北大学教授 小林 広明 東北大学教授 中橋 和博 （工学研究科） 岩手大学教授 船崎 健一

論 文 内 容 の 要 旨

第 1 章 序論

2005 年より京都議定書が正式に発効し、日本には 2008 年-2012 年の間に約 2700 万トン相当の温室効果ガス削減が義務付けられた。仮に我が国の発電所における蒸気タービンの性能が 5%向上されれば、目標値の約 30%が削減可能となるが、蒸気タービンにおける全損失の約 40%が湿りに起因していることが知られているにも関わらず、湿りを考慮した実験的・解析的研究の困難さから、損失改善のための研究開発は殆ど手付かずの状態にあるのが現状である。そこで、実際の翼設計において凝縮現象の影響を高精度で見積ることの出来る CFD コードを開発し、翼設計に応用可能となれば、エネルギーミニマム・環境親和の視点から極めて有意義である。

蒸気タービン内部ではハブとケーシングによって囲まれた有限空間内において、静翼列に対し動翼列が回転運動を繰り返しており、極めて三次元性の強い非定常流れが形成されている。加えて、相変化に伴う潜熱の放出が局所的な温度や圧力の変動をもたらし、揚抗比の変化や作動流体の全圧損失、液滴の付着による翼性能の低下、翼の腐食といった形で翼性能に悪影響を与えている。また、タービン最終段近傍では、衝撃波と境界層や液滴の干渉を伴う極めて複雑な遷音速流れ場が形成されている。

本研究では、電力プラント用蒸気タービンの設計に活用できる CFD コードの開発を前提に、当研究室で構築した非平衡凝縮を伴う非定常圧縮性流れの解析プログラムを拡張し、世界に先駆けて二次元・三次元翼列干渉流れの数値解析を行った。また、これらの研究と並行して、大型計算機だけでなく PC クラスタなどの計算環境にも柔軟に対応し得る並列計算アルゴリズムの構築し、計算時間およびメモリ使用量の低減を達成した。さらに本プログラムに付随する GUI 環境の開発を行った。

第 2 章 遷音速翼列を通る湿り空気流れの全圧損失予測

第 2 章では、非平衡凝縮を伴う湿り空気流れの数値解法を構築して、遷音速翼列を通る湿り空気流れを数値解析し、全圧損失に与える凝縮の影響を数値予測した。ガスタービン翼列や乾燥状態を仮定した蒸気タービン翼列における全圧損失の評価を除けば、凝縮を考慮した全圧損失の解析的な予測が行われるのは本研究が初めてである。

永山らのシュリーレン写真、干渉縞写真および全圧・静圧分布の測定結果と本計算コードによる解析解とを比較し、これらの間に定性的な一致が見られた。特に、全圧低下の主な要因が凝縮によるものであることが解析か

らも確認できた。また、出口流速(圧力比)の大きさにより、凝縮に伴う全圧低下の大きさに違いが生じることが確認された。

第3章 遷音速翼列を通る湿り空気・湿り蒸気流れの乱流解析

第3章では、第2章で構築した非平衡凝縮を伴う湿り空気流れの数値解法に、k-e モデル、SST モデルを適用し、さらに湿り蒸気流れの凝縮モデルを追加して、永山らの湿り空気流れおよび Bakhtar らの湿り蒸気流れの数値解析を行い、計算コードの有効性を検証した。

Baldwin-Lomax モデルおよび k-e モデルを用いた場合では、永山らの実験結果に比べ、後流が薄く捕らえられる傾向があるのに対して SST モデルを適用した場合では後流内全圧・静圧分布の何れについても実験と良好な一致が得られた。また、Bakhtar らの実験を対象とした解析においても SST モデルを適用した場合では、翼面上静圧分布について、実験と良好な一致がみられた。また、静動翼列干渉問題に本計算手法を適用し、凝縮に伴う潜熱の放出に起因した圧力の時間的・空間的変動が捉えられた。また、渦と凝縮現象の相互作用の存在を示唆する解析結果が得られた。

第4章 タービン多段翼列を通る非定常流れの数値計算および流束平均を仮定した数値計算

第4章では、入口湿り度を考慮できる解析手法を開発し、タービン単段翼列ならびにタービン多段静動翼列を通る湿り蒸気流れの数値解析を行い、入口温度および入口湿り度が流れに与える影響について検証した。

まず、タービン単段翼列を通る湿り蒸気について、入口温度および入口湿り度が凝縮に及ぼす影響を考察した。温度に変化を加えた場合では、静動翼列の干渉領域で液滴が生成される条件下で、下流での液滴の質量分率の非定常性が顕著に現れた。入口湿り度に変化を加えた場合では、いずれの条件でもマッハ数分布、温度分布、圧力分布などに大きな差異は認められず、定性的に良く似た流れ場が形成された。以上の結果から、下流での液滴の質量分率の非定常性は主に凝縮の開始位置に左右されることが示された。

次に、三菱製蒸気タービン中圧段近傍二段分の静動翼列干渉流れを対象に、について非定常計算を行い、入口湿り度が下流の凝縮量に及ぼす影響、凝縮による潜熱の放出に伴う主流静圧の変動および渦と凝縮現象の相互作用などについて考察した。解析結果より液滴の生成および成長と渦との間に因果関係を見出した。また、上流における液滴の成長に伴う潜熱の放出が下流の翼列内静圧分布に影響を及ぼすことが確認された。特に入口湿りを与えた場合では液滴の質量分率のコントラストが顕著になる傾向が見られた。

最後に、各段流路間で流束平均を施した場合について湿りを考慮した数値解析を行い、得られた液相質量分率と三菱重工による液相質量分率の概算値と比較することで本解析手法の有効性を検証した。その結果、本解析手法では湿り度を大きく見積る傾向が得られた。

第5章 非平衡凝縮を伴うターボ機械翼列の大規模流動解析

第5章では、本解析プログラムを拡張し、蒸気タービン単段翼列を通る凝縮流れの三次元非定常流動解析を行った。既存の研究では風洞実験を対象とした凝縮を伴う三次元定常解析は行われているものの、翼列干渉問題といった複雑な非定常流れ場に対する解析は全く行われておらず、これら三次元性の強い流れ場における凝縮現象の性状や流れ場への影響は殆ど明らかにされていない。そこで、本研究では世界に先駆けて三次元タービン単段・多段翼列を対象とした、湿り蒸気流れの非定常流動解析を行った。

解析より動翼チップおよびベース付近より発生する二次流れにより液滴の成長が促進されている可能性が示された。多段解析についても現状について説明した。一方、本解析手法を用いた三次元流動解析プログラムの実用性を高めるために、並列処理アルゴリズムを導入した。PC クラスタにて数値解析を行い計算時間の短縮およびメモリ使用量の低減を達成した。

第6章 総括

第6章は本論文の総括である。

論文審査結果の要旨

地球温暖化ガスの削減目標を定めた京都議定書では、日本は 2008-2012 年に、地球温暖化ガス全排出量を年間当たり 6 %削減することが義務付けられている。二酸化炭素は、主要な地球温暖化ガスであり、そのかなりの部分が既存の発電施設から排出されている。蒸気タービンの性能を 5 %向上されると、結果的に上記削減目標の約 30 %が実現できる試算があり、ほとんどの発電施設で使用されている蒸気タービンの性能向上は、エネルギーの節約と地球環境保全の即戦力となる。本論文では、蒸気タービンの湿り損失に着目し、未だ解明されていない湿り損失を数値計算により解析するための大規模流動解析手法を確立することを目的としている。湿り損失はタービン静動翼列の干渉に伴う複雑な非定常三次元流れに起因することが推測されるが、その流れを解析するために、本研究では非平衡凝縮を伴うタービン多段静動翼列の三次元大規模計算が実現できる、スパコンならびに PC クラスタに最適化された解析手法を構築している。

第 1 章は、緒言である。

第 2 章では、非平衡凝縮を伴う湿り空気流れの数値解法を構築して、遷音速翼列を通る湿り空気流れを数値解析し、全圧損失に与える凝縮の影響を実験結果と比較しながら数値予測している。凝縮の全圧損失への影響を定量的に評価することに成功しており、既存の数値解法では成し得なかった画期的な成果である。

第 3 章では、非平衡凝縮を伴う湿り蒸気の凝縮モデルならびに乱流モデルを新たに導入して、蒸気タービン翼列を通る湿り蒸気流れを数値解析しており、凝縮に伴う潜熱の放出に起因する圧力変動の捕獲に成功している。既存の実験結果とも良い一致が得られており、より大規模な数値解析へ本研究を拡張する上で、本数値解法の有効性を示した成果として評価できる。

第 4 章では、非平衡凝縮を伴うタービン多段静動翼列流れの二次元解析コードを構築している。タービン多段翼列の入口湿りの有無による凝縮液滴の成長の違いを時系列的にかつ視覚的にも把握することができるようになり、実機設計への実用化の道を開いた。凝縮を考慮したタービン多段流れの数値解析例は、世界的にも例がなく極めて画期的な成果である。

第 5 章では、第 4 章で構築した二次元解析コードを三次元に拡張している。タービン多段静動翼列流れの三次元解析には、スパコンを用いても膨大な計算時間がかかるが、東北大学情報シナジーセンターのスパコン SX-7 に最適化した解析コードを開発して計算時間の短縮を図っている。また、実機設計への実用化のため、計算格子生成用の前処理ツールの構築や PC クラスタへの移植も同時に行い実用化に向けた着実な成果が得られており、今後の研究展開に期待できる。

第 6 章は、結論である。

以上要するに本論文は、非平衡凝縮を伴うタービン多段静動翼列の大規模流動を数値計算するための、スパコンもしくは PC クラスタに最適化された解析コードを構築することが目的であり、これを実機設計に実用することで、エネルギーミニマムで地球環境にやさしい流体機械を構築しようという点に新規性・実用性がある。したがって、本論文による研究は、情報基礎科学のみならず、機械工学の発展にも寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。